

# 信息融合与响应面联合的渡槽结构模型修正<sup>\*</sup>

张建伟<sup>1,2,3</sup>, 温嘉琦<sup>1,2,3</sup>, 赵瑜<sup>1,2,3</sup>, 王涛<sup>1,2,3</sup>, 黄锦林<sup>4</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046)

(2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心 郑州, 450046)

(3. 河南省水工结构安全工程技术研究中心 郑州, 450046)

(4. 广东省水利水电科学研究院 广州, 510635)

**摘要** 针对大型渡槽损伤诊断研究中有限元模型精度问题, 提出一种基于信息融合与响应面法(response surface method, 简称 RSM)的有限元模型修正方法, 能够兼顾优化目标和参数优化两个环节。以某灌区渡槽为研究对象, 建立初始有限元模型, 采用试验设计方法构建待修正参数与特征频率的设计空间, 经过参数筛选后建立设计样本的响应面模型; 引入自适应噪声的完整集成经验模态分解和奇异值分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise-singular value decompose, 简称 CEEMDAN-SVD)降噪方法联合方差贡献率数据级融合算法, 对正常运行工况下覆盖三跨槽身振测信号进行多通道融合处理以获取完整有效的实测频率, 并以此为目标值对响应面模型进行最优化解, 实现多跨渡槽有限元模型的参数优化。结果表明, 修正后的有限元模型计算出的频率与实测频率吻合较好, 最大误差为-4.38%, 有效解决了大型渡槽结构有限元模型的精度问题, 为后续结构损伤诊断等仿真研究提供基准模型。

**关键词** 渡槽; 有限元模型修正; 信息融合算法; 响应面法; 试验设计; 参数优化

**中图分类号** TV93; TV37; TV32+1

## 引言

渡槽结构是一种重要的输水建筑物, 广泛应用于农业灌溉和其他大型水利工程中<sup>[1]</sup>, 如我国南水北调工程等。渡槽结合水渠与桥梁构造, 是一种较为复杂的结构。尤其是大型多跨渡槽, 由于结构本身的复杂性以及建模过程中隐含理想化假定和简化的客观原因, 使渡槽仿真有限元模型的精度出现较大问题。模型参数的设定极大地影响有限元计算的准确性<sup>[2]</sup>, 在实践中, 为取得目标结果常常经验性地更改参数, 使模型不确定性增大, 进而使计算误差叠加, 可采用模型修正技术来解决这一问题。

针对有限元模型修正技术, 不少学者进行了相关研究, 尤其是在土木工程领域。Beck 等<sup>[3]</sup>将贝叶斯理论应用于模型修正中, 将后验概率密度函数近似为正态分布, 在两自由度剪切框架模型中成功运用。Cheung 等<sup>[4]</sup>提出了一种基于 Metropolis-Hastings(MH)算法的马尔可夫链蒙特卡尔计算方法,

通过两自由度模型验证了其有效性。张春丽等<sup>[5]</sup>将响应灵敏度矩阵用于车-桥耦合系统的有限元模型修正, 识别出桥梁的局部损伤及车辆参数。刘纲等<sup>[6]</sup>通过相关向量机建立有限元模型输入与输出之间的回归模型, 通过四层两跨钢框架结构进行了试验室研究。翁顺等<sup>[7]</sup>提出了一种基于子结构的有限元模型修正方法, 通过求解独立子结构的特征灵敏度和主模态特征解, 提高了模型修正的精度和效率。对于大型工程结构仿真模型修正问题, 如何获取并结合完整有效的振测频率高效精准地优化模型参数还有待研究。

响应面法是以显式的响应面模型逼近特征响应与因素之间复杂的隐式函数关系, 在响应面内做最优化解以实现因素水平的优化。目前模型修正研究大多集中在航空航天结构<sup>[8]</sup>、大型桥梁<sup>[9]</sup>等其他结构<sup>[10]</sup>上, 表现出良好的效果。笔者针对大型多跨渡槽的结构特点选取优化参数, 引入信息融合算法对覆盖三跨槽身振测信号进行多通道融合, 以获取完整有效的实测频率作为模型修正的目标值, 再通

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51679091); 河南省高校科技创新人才计划资助项目(18HASTIT012); 广东省水利科技创新资助项目(2017-16); 华北水利水电大学研究生教育创新计划基金资助项目(YK2017-01)

收稿日期: 2017-12-13; 修回日期: 2018-05-04

过响应面法进行参数优化。

有限元模型修正研究可以视为环境激励下结构模态辨识的反问题,即以实测频率为目标优化结构模型<sup>[11]</sup>。以某工程输水渡槽为研究对象,提出一种兼顾优化目标与参数优化环节的模型修正方法。对建立的三跨渡槽有限元模型进行修正研究,使修正后的模型计算出的频率与实测频率吻合较好,解决了大型多跨渡槽仿真模型精度问题。

### 1 理论基础

模型修正包括两个环节,优化目标的获取以及模型参数的优化。基于信息融合算法以及 RSM 的大型渡槽有限元模型修正能够兼顾两个环节,具体流程如图 1 所示。

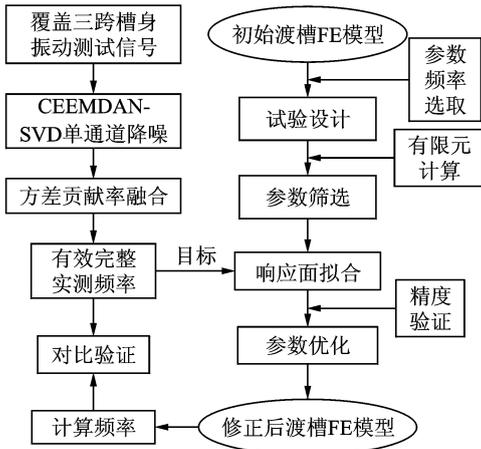


图 1 信息融合联合响应面的渡槽有限元模型修正流程图  
Fig. 1 Process of aqueduct finite element (FE) model updating based on information fusion and RSM

#### 1.1 优化目标

以实测频率为目标对模型参数进行优化,实测频率的完整有效尤为重要。由于原始测试信号受到环境激励作用下高频白噪声以及低频水流噪声的影响,使结构运行真实的振动特性被噪声淹没,严重影响结构模态辨识精度。因此,采用 CEEMDAN-SVD 法<sup>[12-13]</sup>对原始测试信号降噪,降低噪声对结构振动特征信息的影响。引入方差贡献率数据级融合算法<sup>[14]</sup>对多通道振动测试信号融合以获得完整有效的振动频率,方差贡献率能够有效利用不同通道信号的相关性、互补性,使融合后的信息反映结构的整体振动特性。该算法在使用同一种传感器进行数据采集的基础上,能够将大量原始信息进行融合,使内容丰富详细且精确性较高,其基本原理如下。

当有  $p$  个同类传感器在一定时长内同时采集  $h$  个振动数据时,设传感器  $p$  采集的第  $q$  个数据为  $s_{pq}$ ,则该数据在第  $p$  组数据序列中的方差贡献率为  $K_{pq}$ ,计算公式为

$$K_{pq} = \frac{(s_{pq} - \mu_p)^2}{h\sigma_p^2} \quad (1)$$

其中: $\mu_p, \sigma_p^2$  分别为采集到的  $h$  个数据的期望和方差。

$S_{pq}$  的融合系数  $a_{pq}$  以及融合结果  $S_q$  的计算公式分别为

$$a_{pq} = \frac{K_{pq}}{\sum_{p=1}^p K_{pq}} \quad (2)$$

$$S_q = \sum_{p=1}^p a_{pq} s_{pq} \quad (3)$$

#### 1.2 试验设计

试验设计是多因素优化设计模型的取样策略,利用试验设计,可以用较少的样本点数保证较高的响应面模型精度<sup>[15]</sup>。试验设计包括 3 个要点:确定全体试验因素、正确选定的试验因素水平值以及确定适宜的水平区间。中心复合设计是根据二次多项式的特点进行构造,所取的样本值为设计空间的中心点和各个因子的端点<sup>[16]</sup>。其两因素( $k=2$ )试验点分布见图 2,有 3 类试验点组成,其中包括 2 个星号试验点、2 个水平试验点和 1 个零水平试验点<sup>[17]</sup>。

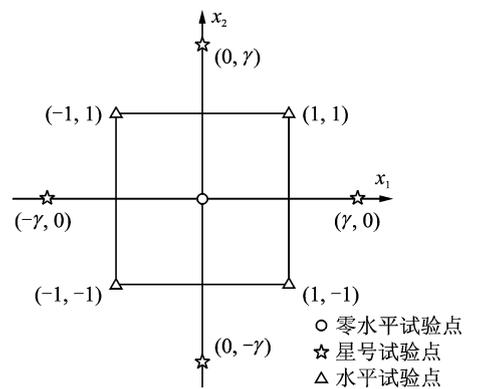


图 2 两因素中心复合设计试验点分布  
Fig. 2 Sampling in central composite design of experiment for  $k=2$

#### 1.3 参数筛选

传统的模型修正技术采用灵敏度分析方法,其仅计算特征响应的局部灵敏度。笔者采用方差分析法,从全局角度出发,在整个设计空间上挑选对特征量有显著性影响的试验因素<sup>[18]</sup>。采用方差分析的

F 检验法进行假设检验,将样本数据的总偏差平方和分解为参数和其误差的偏差平方和,评估参数对特征响应频率的显著性影响。

假设  $A$  为某个设计因素,对其进行  $F$  检验,统计量为

$$F_A = \frac{SS_A/f_A}{SS_e/f_e} \sim F(J_A, J_e) \quad (4)$$

其中: $f_A$  和  $f_e$  分别为因素和偏差的自由度; $SS_A$  为样本数据中由因素导致的偏差平方; $SS_e$  为误差导致的偏差平方和。

对于给定的显著性水平  $\alpha$ ,  $F$  检验法则为:若  $F \geq F_{1-\alpha}(f_A, f_e)$ , 则认为设计参数  $A$  影响显著,否则认为不显著。

#### 1.4 响应面法

通过一系列确定性的“输入-输出”试验设计得到样本数据,拟合一个模拟真实极限状态的曲面就是响应面模型。其本质是通过假设一个包含未知数的极限状态函数与基本变量之间的解析表达式来替代真实而不能明确表达出的极限状态函数<sup>[17]</sup>。响应面法是一项统计学的综合优化方法,用于处理几个因素对一个系统的作用问题,也就是系统的输入(因素)与输出(响应)的转换关系问题。笔者采用二次多项式响应面模型,公式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \quad (5)$$

其中: $x_i \in [x_i^l, x_i^u]$ ,  $x_i^l$  和  $x_i^u$  为试验因素的水平区间; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$  为回归系数。

对构建完成后的响应面模型进行精度检验,对于多个响应面模型和较复杂模型,主要采用复相关系数( $R^2$ )检验以及相对均方根误差(root mean squared error,简称 RMSE)检验等,计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N [y_{RS}(j) - y(j)]^2}{\sum_{j=1}^N [y(j) - \bar{y}]^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \frac{1}{N_y} \sqrt{\sum (y - y_{RS})^2} \quad (7)$$

其中: $y_{RS}$  为响应面模型的计算值; $y$  为结构有限元模型计算结果; $\bar{y}$  为有限元结果的均值; $N$  为设计空间中特征响应的数量。

$R^2$  的取值范围为 0~1,取值越接近 1,表明拟合的响应面模型越准确。当  $R^2$  的值小到一定程度,应该重新规划因素水平后进行试验设计。RMSE 值检验法则的情况相反。

## 2 渡槽有限元模型修正

### 2.1 工程概况及有限元建模

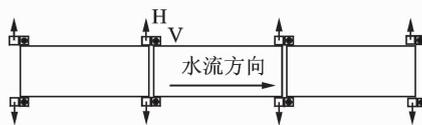
某大流量农业灌溉工程,其总扬程达 713 m,总干渠渡槽共 26 座。渡槽槽身断面类型为 U 型薄壁结构,半径为 2 m,单跨长为 12 m;槽身纵向为简支梁结构,排架支撑为  $\pi$  型钢混结构;基础设计尺寸为 5 m×2.0 m×2.0 m,基础底部到槽顶高为 18.5 m;槽体腹板厚度尺寸为 0.2 m,槽底底板厚度尺寸为 0.8 m,槽体排架设计横断面尺寸为 0.7 m×0.5 m,槽内设计水深为 2.66 m<sup>[19]</sup>。以正常运行工况为振动测试工况,现场振测采用耐冲击 DP 型地震式低频振动传感器采集振动响应信号,采样频率为 51.2 Hz,采样时间达 1 200 s。每跨槽身的四端分别布置 4 个测试点,每个测试点包含水平横向(H)和竖直(V)两个方向,工程及测试图片如图 3 所示。



(a) 灌区渡槽  
(a) The aqueduct in the irrigation area



(b) 测点布置实况  
(b) Measuring points layout in vibration test



(c) 三跨槽身测点布置示意图  
(c) Schematic picture of measuring points layout

图 3 某灌区渡槽及振测照片

Fig. 3 Photo of aqueduct and vibration test in a irrigative area

根据设计资料,建立紧邻出水塔三跨初始渡槽有限元模型,如图 4 所示。材料参数类型包括:橡胶支座竖向及水平刚度;槽身、排架及基础动弹模和钢筋混凝土等效密度;水体密度。地基为无质量地基,模拟范围为:水流向(纵向)沿槽端各延伸 1 倍渡槽高度(槽体上端至基础底面总高度);横向向(横向)沿基础边缘各延伸 1 倍渡槽高度;深度沿竖向取 1 倍渡槽高度。

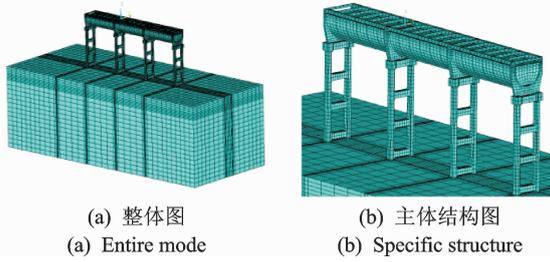


图 4 渡槽有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the aqueduct structure

## 2.2 试验设计及计算结果

针对大型渡槽结构特点,在槽身、橡胶支座、排架及其基础 3 个不同部位确定修正参数,分别为槽身弹性模量  $E_1$  ( $10^4$  MPa)、密度  $M_1$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );排架及基础弹性模量  $E_2$  ( $10^4$  MPa)、密度  $M_2$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );橡胶支座竖向弹簧刚度  $K_V$  (MN/mm)及水平(横向+纵向)弹簧刚度  $K_H$  (MN/mm)6 个参数,其中密度和弹模分别按照钢筋混凝土等效密度和等效动弹模取值,密度容许误差定为  $50 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

去除具有明显相关性的模态频率,选取横向前 4 阶模态频率作为特征响应(横向是小跨度 U 型渡槽结构的主要振动方向)。通过中心复合试验设计构件待修正参数的设计空间,6 个因素共生成 86 组试验样本。将每组试验样本输入初始有限元模型中进行模态分析,获得响应频率。试验设计部分样本值(因素/参数+响应/频率)如表 1 所示,其中  $T_1, T_2, T_3$  和  $T_4$  分别表示横向 1,2,3,4 阶模态频率,单位为 Hz。

表 1 试验设计样本值

Tab. 1 The sample values of the experimental design

组序	$K_V/$ ( $\text{MN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$K_H/$ ( $\text{MN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$E_1/$ $10^4$ MPa	$M_1/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E_2/$ $10^4$ MPa	$M_2/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$T_1/$ Hz	$T_2/$ Hz	$T_3/$ Hz	$T_4/$ Hz
1	15.00	0.50	3.328	2 475.00	2.784	2 525	1.680 7	2.113 3	2.899 7	10.134 5
2	5.00	0.50	3.328	2 475.00	4.176	2 425	2.004 0	2.501 8	3.415 7	10.938 3
3	5.00	5.00	4.992	2 475.00	2.784	2 425	1.737 3	2.221 6	3.232 3	9.867 0
4	5.00	5.00	4.992	2 575.00	2.784	2 525	1.574 4	2.012 5	2.896 2	10.563 4
5	5.00	5.00	4.992	2 475.00	2.784	2 525	1.710 5	2.179 7	3.135 9	9.605 0
6	5.00	5.00	4.992	2 475.00	4.176	2 525	2.023 2	2.560 7	3.576 4	10.086 4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	15.00	5.00	4.992	2 475.00	2.784	2 425	1.732 7	2.224 2	3.237 1	11.954 6
81	15.00	0.50	3.328	2 475.00	2.784	2 425	1.700 2	2.149 8	2.983 2	10.048 4
82	2.17	2.75	4.160	2 525.00	3.480	2 475	1.793 3	2.275 1	3.181 8	10.613 5
83	5.00	0.50	4.992	2 475.00	4.176	2 425	2.028 3	2.559 6	3.540 6	10.841 7
84	10.00	2.75	4.160	2 525.00	3.480	2 475	1.797 7	2.283 2	3.195 7	12.453 7
85	10.00	2.75	4.160	2 334.63	3.480	2 475	1.928 5	2.444 2	3.421 6	9.853 0
86	5.00	0.50	4.992	2 475.00	2.784	2 425	1.716 9	2.189 0	3.092 7	11.806 6

## 2.3 参数显著性分析

采用 F 检验法计算所选参数对统计特征量的显著性水平  $P$  值,评估参数对特征响应频率的显著性影响。各参数、交互项及二次项对横向前 4 阶的显著性水平如图 5 所示,纵坐标为  $P$  值,横坐标为所选参数,其中  $A, B, C, D, E$  和  $F$  分别表示  $K_V, K_H, E_1, M_1, E_2$  和  $M_2$ 。根据设定的显著性水平,  $P$  值小于 0.05 (图中蓝色水平线)表明差异较为显著,否则不显著。

由图 5 可以直观看出,参数  $C, D, E, F$  对横向前 4 阶频率的影响都高度显著,参数  $B$  单独对横向第 2 阶频率影响显著,而对横向 1,3,4 阶频率影响不显著;二次项  $E^2$  对横向第 3 阶频率的影响高度显著,同时,二次项  $C^2$  和  $F^2$  对横向第 4 阶频率影响高度显著;交互项  $DE$  对横向第 1 阶和第 2 阶频率影响显著。通过方差分析,筛选出对响应频率影响显著的参数构建响应面模型,保证响应面模型的精度以及参数优化的有效性。

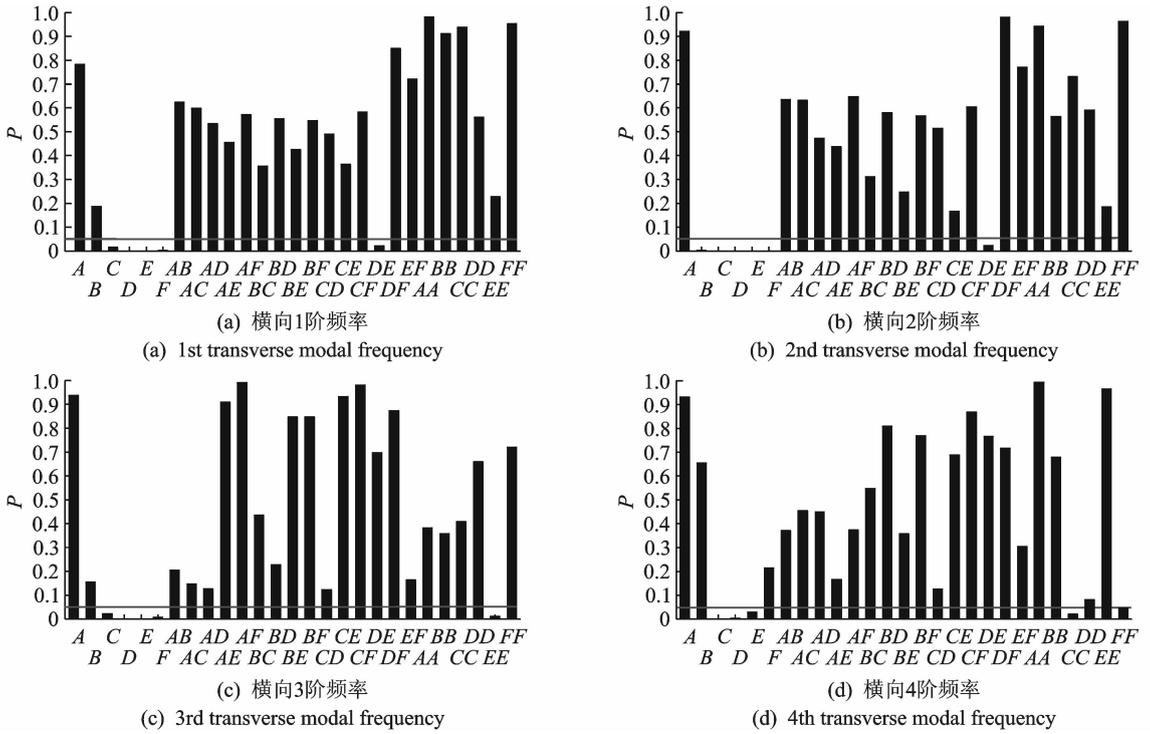


图5 各参数对响应频率的显著性分析

Fig. 5 The significance of response frequency on each parameter

2.4 实测数据处理及RSM拟合

选取覆盖三跨槽身的8个测试点(见图3(c))水平方向8个通道进行降噪处理,图6为某典型单通道降噪前后的时程线,可以看出CEEMDAN-SVD法良好的降噪效果,降噪后的结果真实反映结构振动特征信息。降噪后利用方差贡献率数据融合算法对降噪后各通道信号进行融合,提取结构的完备振动频率。融合后的功率谱密度见图7。根据模型修正需要,提取前4阶频率作为有限元模型修正的目标值,分别为1.88,2.28,3.15和9.85 Hz。

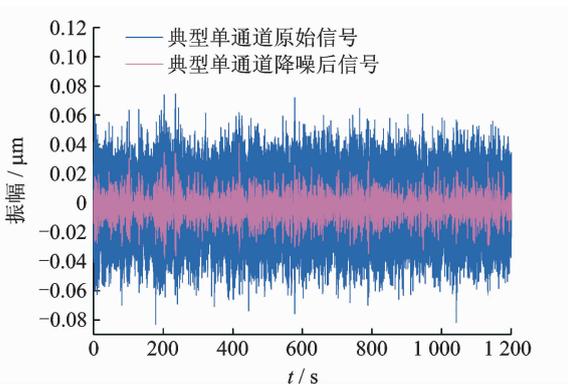


图6 CEEMDAN-SVD法典型单通道信号降噪前后时程图  
Fig. 6 Time history curve of original and de-noised signal of a typical channel by CEEMDAN-SVD method

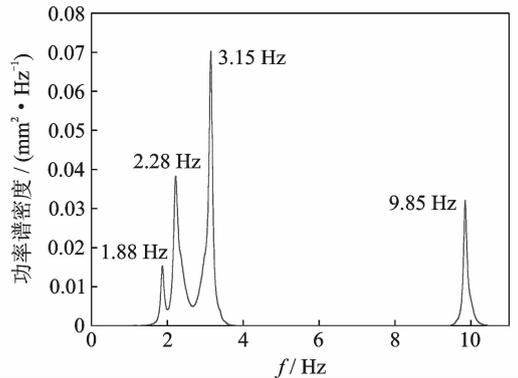


图7 多通道测点融合后频谱

Fig. 7 Frequency spectrum of vibration test on the aqueduct structure after multi-channel fusion

选取显著性较高的参数,以获得的实测频率作为优化目标,将优化样本按照考虑交互项影响和不考虑交互项影响拟合出各阶响应的响应面模型。给出考虑交互项时横向前4阶的回归响应面,如图8所示。采用复相关系数 $R^2$ 值对回归后的响应面进行精度检验,计算结果如表2所示。由表2可以看出:a.考虑交互项和不考虑交互项的响应面精度相差不大,前者相对精度较高;b.横向前3阶 $R^2$ 值基本上都接近于1,说明在参数与频率的设计空间内,这4阶的回归响应面模型精度较高,能较好地反映

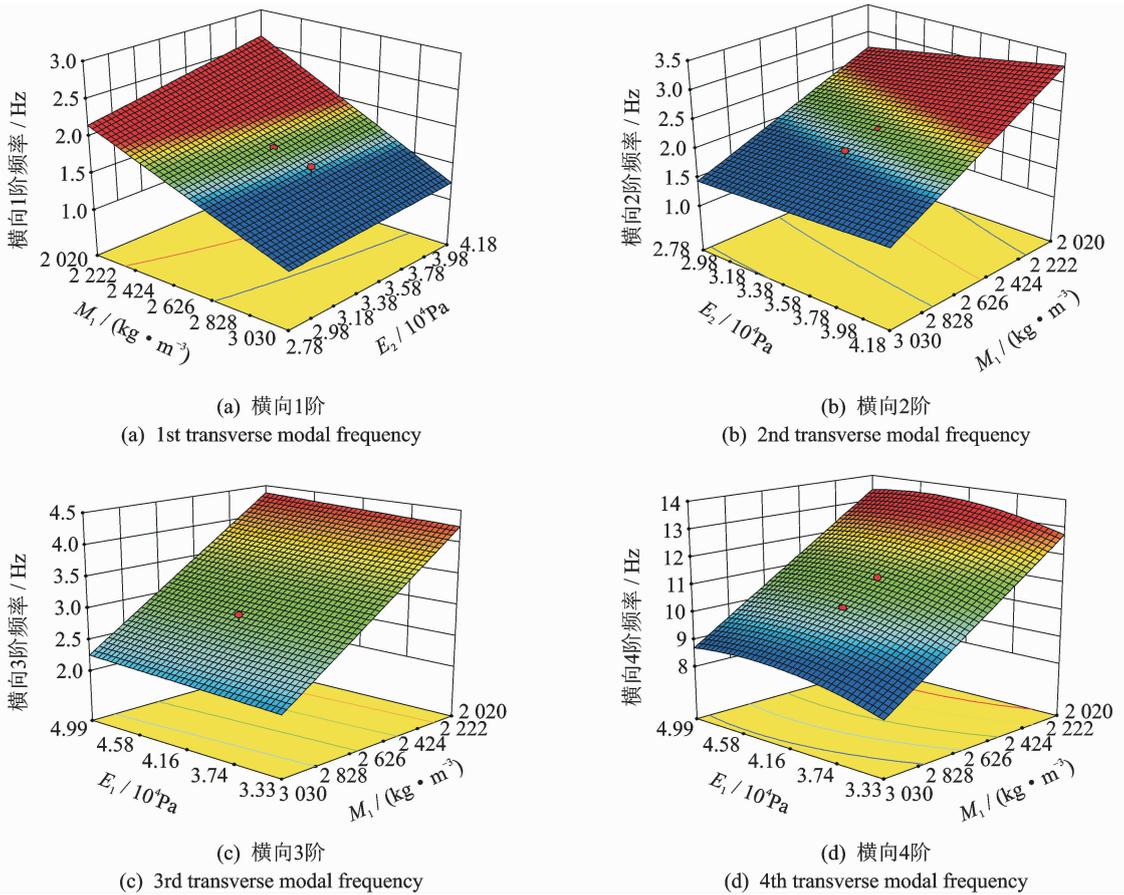


图 8 参数对各特征频率的回归响应面

Fig. 8 Response surfaces of parameters on each characteristic frequency

特征响应频率与参数间的关系;c. 横向第 4 阶  $R^2$  值相对较低,考虑交互项后大于 0.6,在保证获得有效优化参数的条件下保留。

表 2 各阶响应面精度检验

Tab. 2 The accuracy inspection of each response surface

响应频率/Hz	考虑交互项 $R^2$ 值	不考虑交互项 $R^2$ 值
$T_1$	0.969 1	0.966 6
$T_2$	0.965 7	0.963 1
$T_3$	0.945 7	0.930 8
$T_4$	0.640 8	0.611 4

### 2.5 参数优化及模型验证

对响应面模型进行非线性最优化求解,获得目标响应下的最优参数值,实现有限元模型的参数修正。修正前后的参数见表 3,其中最大修正率为 +139%,最大修正值为 +45 kg(允许偏差 50 kg),这些参数依旧保留了其原本的物理意义。参数优化并不是对单个参数的优化,而是对有限元模型对象全体参数空间的优化。优化后的参数设置使有限元模型振动频率最大限度地接近实际结构。

将输出的优化后参数输入有限元模型中进行分析,将其计算得到的频率与目标实测频率进行对比,如表 4 所示。分析可知:有限元模型修正后计算得到的频率跟实测频率吻合良好,修正后有限元计算

表 3 参数优化前后对比

Tab. 3 Comparison of parameters pre- and post-optimized

参数	$K_V$	$K_H$	$E_1$	$M_1$	$E_2$	$M_2$
初始值	8	2.00	4.16	2 525.00	3.48	2 475.00
修正值	10	4.78	3.33	2 554.79	3.94	2 520.09
修正率(值)	+25%	+139%	-20%	+20	+13%	+45

表 4 修正前后频率与实测频率对比

Tab. 4 Comparison of measured frequency and FE model frequency pre- and post-updated

模态 阶次	修正前		实测 频率/ Hz	修正后		
	计算 频率/Hz	误差/ %		计算 频率/Hz	误差/ %	计算频率 对比/%
$T_1$	1.680 7	-10.60	1.88	1.797 7	-4.38	+6.96
$T_2$	2.113 3	-7.31	2.28	2.254 3	-1.13	+6.67
$T_3$	2.899 7	-7.95	3.15	3.156 6	+0.21	+8.86
$T_4$	11.372 4	+15.46	9.85	9.986 5	+1.39	-12.19

误差=(计算频率-实测频率)/实测频率

频率与实测频率相对误差大幅减小,最大误差为 $-4.38\%$ ,最小误差为 $+0.21\%$ ;修正前后有限元计算频率得到有效纠正,最大修正值达 $-12.19\%$ 。综

上所述,基于信息融合算法和RSM的有限元模型修正在大型渡槽结构上得到了有效运用。修正后的渡槽模态计算振型云图如图9所示。

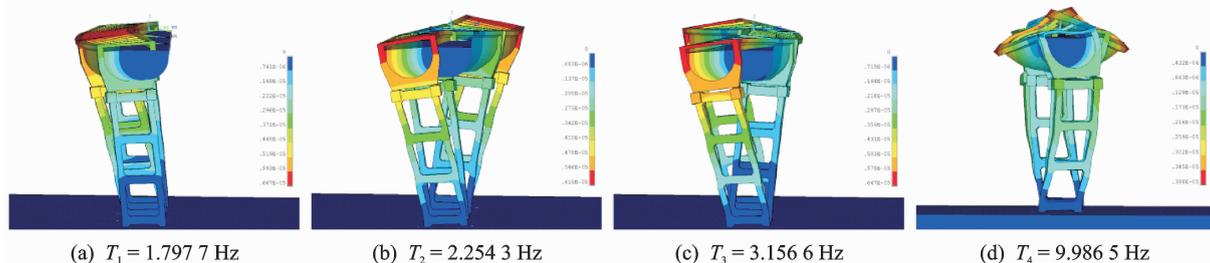


图9 修正后模态计算振型图

Fig.9 Vibration mode of finite element model after updating

### 3 结论

1) 优化目标环节中,通过CEEMDAN-SVD降噪联合方差贡献率多通道融合技术处理覆盖三跨槽身振测信号,获得了完整有效的实测频率,为模型修正参数优化环节提供目标响应值以及修正后的验证参考值。

2) 参数优化环节中,通过中心复合设计方法构建模型参数与自振频率的样本空间,经过参数筛选后构造响应面模型。修正后的渡槽有限元模型计算出的模态频率与实测频率吻合良好,最大误差为 $-4.38\%$ ,最小误差为 $+0.21\%$ ,有效解决了大型渡槽有限元模型的精度问题。

3) 修正后的有限元模型可以作为大型渡槽损伤诊断等仿真研究的基准有限元模型。为复杂结构仿真研究提供一种常效性科学步骤,用于模型修正或者检验应用模型的准确性。

### 参 考 文 献

[1] 刘德仁,张东,张世民. 北方寒冷地区封闭渡槽粘贴聚氨酯板提高保温效果[J]. 农业工程学报,2013,29(9):70-75.  
Liu Deren, Zhang Dong, Zhang Shimin. Increase insulation effect of polyurethane board pasting on closed aqueduct surface in cold regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9):70-75. (in Chinese)

[2] Seifi R, Abbasi K. Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 57;

310-322.

[3] Beck J L, Au S K. Bayesian updating of structural models and reliability using Markov chain Monte Carlo simulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002,128(4):380-391.

[4] Cheung S H, Beck J L. Bayesian model updating using hybrid Monte Carlo simulation with application to structural dynamic models with many uncertain parameters [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009,135(4):243-255.

[5] 张春丽,吕中荣. 基于响应灵敏度分析的桥梁结构损伤和车辆参数的识别[J]. 振动与冲击,2016,35(9):168-171.  
Zhang Chunli, Lü Zhongrong. Identification of a bridge's structural damage and vehicular parameters based on dynamic response sensitivity analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(9):168-171. (in Chinese)

[6] 刘纲,罗钧,秦阳,等. 基于改进MCMC方法的有限元模型修正研究[J]. 工程力学,2016,33(6):138-145.  
Liu Gang, Luo Jun, Qin Yang, et al. A finite element model updating method based on improved MCMC method[J]. Engineering Mechanics, 2016,33(6):138-145. (in Chinese)

[7] 翁顺,左越,朱宏平,等. 基于子结构的有限元模型修正方法[J]. 振动与冲击,2017,36(4):99-104.  
Weng Shun, Zuo Yue, Zhu Hongping, et al. Model updating based on a sub-structuring method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(4):99-104. (in Chinese)

[8] 鲍诺,王春洁,赵军鹏,等. 基于响应面法的结构动力学模型修正[J]. 振动与冲击,2013,32(16):54-58.  
Bao Nuo, Wang Chunjie, Zhao Junpeng, et al. Model

- updating of structure dynamics based on response surface methodology[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013,32(16):54-58. (in Chinese)
- [9] 周林仁, 欧进萍. 基于径向基函数响应面方法的大跨度斜拉桥有限元模型修正[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(3):8-14.  
Zhou Linren, Ou Jinping. Finite element model updating of long-span cable-stayed bridge based on the response surface method of radial basis function[J]. *China Railway Science*, 2012,33(3):8-14. (in Chinese)
- [10] 陶征, 刘旭, 郭勤涛. 响应面法用于磨机传动系统扭转振动模型修正[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(6):1222-1226.  
Tao Zheng, Liu Xu, Guo Qintao. Torsional vibration model updating for the mill transmission system based on response surface method[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(6):1222-1226. (in Chinese)
- [11] 王海军, 郑韩慈, 周济芳. 水电站厂房结构密集模态识别研究[J]. *水力发电学报*, 2016,35(2):117-123.  
Wang Haijun, Zheng Hanci, Zhou Jifang. Study on modal identification of powerhouse structures with closely spaced modes[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016,35(2):117-123. (in Chinese)
- [12] 张建伟, 暴振磊, 江琦, 等. 基于 SVD 与改进 EMD 联合的泄流结构工作特性信息提取[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016,24(4):698-711.  
Zhang Jianwei, Bao Zhenlei, Jiang Qi, et al. Research on characteristics information identification for flood discharge structure based on SVD and improved EMD [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(4):698-711. (in Chinese)
- [13] 张建伟, 侯鸽, 暴振磊, 等. 基于 CEEMDAN 与 SVD 的泄流结构振动信号降噪方法[J]. *振动与冲击*, 2017,36(22):138-143.  
Zhang Jianwei, Hou Ge, Bao Zhenlei, et al. A signal de-noising method for vibration signals from flood discharge structures based on CEEMDAN and SVD[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(22):138-143. (in Chinese)
- [14] 李火坤, 张宇驰, 邓冰梅, 等. 拱坝多传感器振动信号的数据级融合方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2015,35(6):1075-1082.  
Li Huokun, Zhang Yuchi, Deng Bingmei, et al. Study on multi-sensor data-level fusion method of high arch dam vibration signal[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(6):1075-1082. (in Chinese)
- [15] 贾超, 张凯, 张强勇, 等. 基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J]. *岩土力学*, 2014,35(6):1718-1726.  
Jia Chao, Zhang Kai, Zhang Qiangyong, et al. Research on multi-factor optimization of underground laminated salt rock storage group based on orthogonal experimental design [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014,35(6):1718-1726. (in Chinese)
- [16] 王俊, 申立中, 杨永忠, 等. 基于响应曲面法的非道路用高压共轨柴油机设计点优化标定[J]. *农业工程学报*, 2017,33(3):31-39.  
Wang Jun, Sheng Lizhong, Yang Yongzhong, et al. Optimizing calibration of design points for non-road high pressure common rail diesel engine base on response surface methodology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(3):31-39. (in Chinese)
- [17] 陈立恒, 吴清文, 董吉洪, 等. 基于中心复合设计的空间相机热计算参数修正[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9):2009-2015.  
Chen Liheng, Wu Qingwen, Dong Jihong, et al. Parameter correction of thermal analysis for space camera based on center composited design[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9):2009-2015. (in Chinese)
- [18] Shan D, Li Qiao, Khan I, et al. A novel finite element model updating method based on substructure and response surface model [J]. *Engineering Structures*, 2015,103:147-156.
- [19] 张建伟, 曹克磊, 赵瑜, 等. 基于流固耦合模型的 U 型渡槽模态分析及验证[J]. *农业工程学报*, 2016,32(18):98-104.  
Zhang Jianwei, Cao Kelei, Zhao Yu, et al. Modal analysis and validation of U-shaped aqueducts based on fluid solid interaction model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(18):98-104. (in Chinese)



**第一作者简介:**张建伟,男,1979年3月生,博士、教授。主要研究方向为水工结构耦联振动与安全。曾发表《Signal denoising method for vibration signal of flood discharge structure based on combined wavelet and EMD》(《Journal of Vibration & Control》2017, Vol. 23, No. 15)等论文。

E-mail: zjwcivil@126.com